

**PENGUKURAN KECEPATAN ALIRAN AIR DENGAN
EFEK DOPPLER GELOMBANG OPTIS
SISTEM BERKAS RANGKAP**

Endang Purwaningsih ¹⁾, Karyono ²⁾ dan P. Anggraita ³⁾

INTI SARI

Telah dilakukan pengukuran kecepatan aliran air tanpa mengganggu aliran dengan menggunakan Sistem Berkas Rangkap dan sistem Debit sebagai pembanding. Pengukuran ini didasarkan pada frekuensi pergeseran Doppler dari cahaya yang dihamburkan oleh partikel yang sedang bergerak.

Hasilnya menunjukkan bahwa kecepatan rata-rata aliran air dengan sistem Berkas Rangkap dan Debit tersebut saling cocok dalam jangkau 0,7 sampai 20 cm/s dan hasil-hasil ini sesuai dengan pengukuran frekuensi antara 0,8 sampai 25 Khz.

**WATER FLOW SPEED MEASUREMENTS
WITH OPTICAL DOUBLE-BEAM DOPPLER EFFECT**

Endang Purwaningsih ¹⁾, Karyono ²⁾ dan P. Anggraita ³⁾

ABSTRACT

The velocity measurement of water flow without disturbing the flow of water has been carried out using the flow dual beam and the debit systems as refference. This measurement bases on the determination of the Doppler shift of light scattered from moving particles.

The result showed that the everage velocity of the water flow measured by this method are in a good agreement in the range of 0.7 to 20 cm/s, which are related to measured frequencies of 0.8 Khz to 25 kHz.

Kata-kata kunci : Laser - Efek Doppler - Sistem Berkas Rangkap.

¹⁾ Staff Pengajar IKIP Malang

²⁾ Staff Pengajar FMIPA UGM

³⁾ Staff Peneliti PPNY BATAN Yogyakarta

I. PENDAHULUAN

Efek Doppler dengan gelombang optis pada mulanya banyak digunakan dalam bidang astronomi yaitu untuk menentukan laju benda-benda langit yang bercahaya. Ditemukannya sinar laser pada tahun 1960 oleh Javan, Bennet dan Harriot (Laud, 1985) yang antara lain bersifat koheren, memungkinkan diperoleh dan dimanfaatkannya gejala interferensi. Dengan bantuan sinar laser ini efek Doppler dapat diamati pada benda-benda yang ukurannya jauh lebih kecil dari benda-benda langit yaitu pada partikel-partikel yang ada dalam fluida atau gas. Dengan kata lain pergeseran frekuensi yang sangat kecil dari hamburan cahaya oleh partikel yang ada dalam fluida dan gas akibat dari gerak relatif partikel terhadap sumber dan pengamat dapat diukur dan pergeseran frekuensi ini dikenal sebagai pergeseran Doppler. Alat yang menggunakan prinsip perhitungan frekuensi pergeseran Doppler dari cahaya laser untuk menentukan kecepatan partikel yang mengalir dinamakan *Laser Doppler Velocimeter (LDV)*. Alat ini pertama kali didominasi oleh Yeh dan Cummins pada tahun 1964 yang mengamati pergeseran hamburan cahaya dari partikel dalam aliran air (Drain, 1980). LDV ini dibandingkan dengan alat pengukur kecepatan aliran yang lebih konvensional, mempunyai kelebihan antara lain, keluarannya berbanding langsung dengan kecepatan yang diukur dan tidak mengganggu aliran karena ada kontak langsung dengan bendanya. Sedang keterbatasannya antara lain, mediumnya harus transparan dan memerlukan partikel penghambur (Drain, 1980).

Dalam penelitian ini kecepatan aliran air dihitung berdasarkan hasil pengukuran frekuensi pergeseran Doppler. Teknik yang cocok untuk mengukur pergeseran Doppler yang sangat kecil ini adalah teknik layangan optik atau interferensi (Drain, 1980). Proses layangan optik terjadi di dalam PMT. Keluaran PMT yang mengandung informasi pergeseran Doppler berupa foton yang kemudian dicacah oleh MCS dan dengan menggunakan Transformasi Fourier diperoleh frekuensi pergeseran Dopplernya.

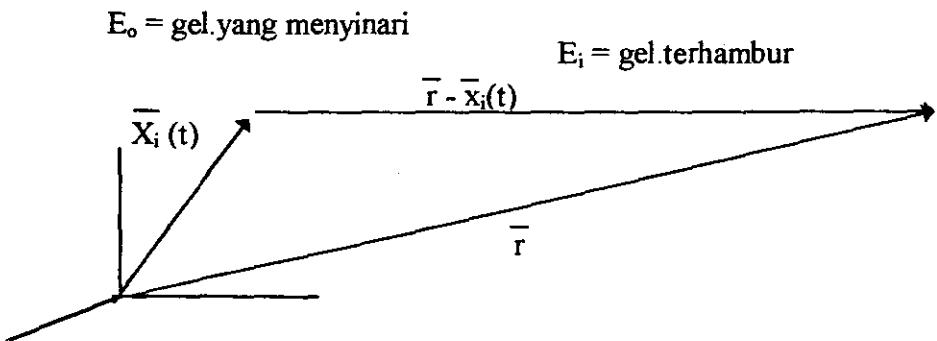
II. Landasan Teori

Interferensi adalah superposisi dua gelombang yang menghasilkan pola intensitas baru yang bervariasi. Variasi intensitas ini dikenal dengan pola garis-garis interferensi (fringe interference). Intensitas hasil perpaduan dua gelombang merupakan jumlah intensitas masing-masing gelombang ditambah suku ketiga yang disebut suku interferensi (Klein dan Furtak, 1986).

Bila dua gelombang bidang paralel masing-masing dengan panjang gelombang λ dipotongkan dengan sudut α maka pola interferensi pada layar akan berupa garis-garis rumbai (fringe) gelap-terang dengan jarak rumbai

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha_2} \quad (1)$$

Jika ditinjau satu partikel ke i yang terletak pada $x_i(t)$ dan disinari oleh gelombang bidang dengan kuat medan listrik \vec{E}_0 yang terpolarisasi linear dengan arah \hat{p} arah penjarangan \hat{s} , angka gelombang $k = 2\pi/\lambda$, frekuensi ω_0 dan intensitasnya $I_0(\text{W/m}^2)$, ditunjukkan dalam Gambar 1, yang dalam bentuk kompleks dapat ditulis (Dalley dkk, 1984)



Gambar 1. Cahaya yang dihamburkan oleh partikel yang bergerak (Dalley dkk, 1984)

$$\bar{E}_o = \sqrt{I_o(\bar{x})} e^{j\phi_o(\bar{x})} \hat{p} \quad (2)$$

dengan $\phi_o(\bar{x})$ adalah fase yang diukur pada \bar{x}

$$\phi_o(\bar{x}) = \omega_o t - k \hat{s} \cdot \bar{x} \quad (3)$$

Partikel tersebut menghamburkan gelombang cahaya yang diterima dari E_o ke segala arah dan medan listrik yang dihamburkan (Kerker, 1969),

$$E_i = \sqrt{I_o(\bar{x}_i)} \frac{\sigma_i}{k |(\bar{r} - \bar{x}_i)|} e^{j[\phi_o(\bar{x}_i) - k|\bar{r} - \bar{x}_i|]} \quad (4)$$

dengan σ_i koefisien hamburan untuk partikel ke i. Karena daerah yang disinari gelombang cahaya datang sangat kecil $|\bar{x}_i| \leq |\bar{r}|$, maka vektor $|\bar{r} - \bar{x}_i|$ dan \bar{r} adalah paralel dan $|\bar{r} - \bar{x}_i| \cong r - \bar{x}_i \cdot \hat{r}$ sehingga

$$E_i = \sqrt{I_o} \frac{\sigma_i}{kr} e^{j\phi_i} \quad (5a)$$

$$\phi_i = \omega_o t - kr + k\bar{x}_i \cdot (\hat{r} - \hat{s}) \quad (5b)$$

Persamaan (5a) ini menyatakan bahwa gelombang yang dihamburkan adalah gelombang sferik yang memancar dari titik asal (karena $|\bar{x}_i|$ kecil) dan fasenya bergantung pada posisi partikel (karena $k \hat{x}_i \cdot \hat{s}$).

Frekuensi sesaat dari sinyal didefinisikan sebagai turunan pertama dari fase terhadap waktu.

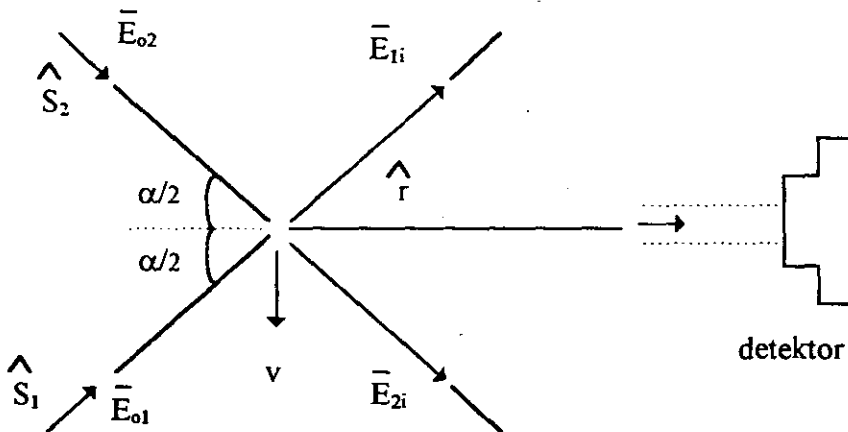
$$\dot{\phi}_i = \omega_o - k\bar{v}_i \cdot (\hat{r} - \hat{s}) \quad (6)$$

Persamaan (6) menyatakan frekuensi pergeseran Doppler dalam radian per detik, yang ditimbulkan oleh partikel ke i yang bergerak dengan kecepatan $v_i(t)$. Frekuensi pergeseran Doppler dalam Hz dinotasikan

$$\nu_i = \frac{\dot{\phi}_i}{2\pi} = \nu_0 + \frac{\nu_i \cdot (\hat{r} - \hat{s})}{\lambda} \quad (7)$$

ν_0 adalah frekuensi berkas yang menyinari partikel. Ada beberapa metode untuk mengukur frekuensi pergeseran Doppler ini, salah satunya adalah Sistem Berkas Rangkap.

Prinsip dasar sistem berkas rangkap dalam LDV adalah menyinari partikel penghambur dengan dua gelombang cahaya bidang secara simultan, kemudian menangkap kedua gelombang yang dihamburkan oleh partikel pada arah \hat{r} dengan detektor



Gambar 2. Skema geometri optik Sistem Berkas Rangkap
(Dalley dkk, 1984)

Dua gelombang bidang yang menyinari partikel adalah E_{oi1} dan E_{o2} , masing-masing menjalar dalam arah \hat{s}_1 dan \hat{s}_2 seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.

Partikel ke i menghamburkan gelombang dari E_{oi1} dan E_{oi2} ke arah \hat{r} . Frekuensi gelombang terhambur dalam arah hamburan \hat{r} adalah

$$\nu_{1i} = \nu_{o1} + \frac{\bar{v}_i \cdot (\hat{r} - \hat{s}_1)}{\lambda} \quad (8a)$$

$$\nu_{2i} = \nu_{o2} + \frac{\bar{v}_i \cdot (\hat{r} - \hat{s}_2)}{\lambda} \quad (8b)$$

yang perbedaan frekuensinya

$$\nu_{1i} - \nu_{2i} = \nu_s + \nu_{Di} \quad (9)$$

dengan

$$\nu_s = \nu_{o1} - \nu_{o2} \quad (10)$$

adalah perbedaan frekuensi yang besarnya konstan, yaitu frekuensi berkas 1 (ν_{o1}) dan frekuensi berkas 2 (ν_{o2}) yang menyinari partikel.

Perbedaan frekuensi karena pergeseran Doppler adalah

$$\nu_{Di} = \frac{\bar{v}_i \cdot (\hat{s}_2 - \hat{s}_1)}{\lambda} \quad (11)$$

Dari persamaan (11) terlihat bahwa frekuensi pergeseran Doppler tidak bergantung pada arah hamburan. Bentuk persamaan (11) dapat ditulis

$$\nu_{Di} = \frac{\bar{K} \cdot \bar{v}_i}{2 \pi} \quad (12)$$

dengan

$$\bar{K} = \frac{2\pi(\hat{s}_2 - \hat{s}_1)}{\lambda} \quad (13)$$

adalah vektor gelombang dalam arah $(\hat{s}_2 - \hat{s}_1)$

Jika $\bar{u}_i(t)$ adalah komponen \bar{v}_i dalam arah $(\hat{s}_2 - \hat{s}_1)$, maka

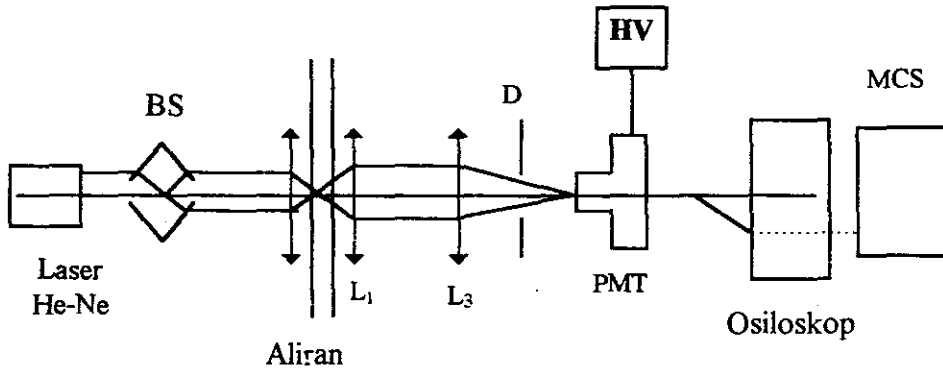
$$\nu_{Di} = \frac{K u_i(t)}{2 \pi} \quad (14)$$

$$\text{dengan} \quad |\bar{K}| = K = \frac{4\pi \sin \alpha/2}{\lambda} \quad (15)$$

Jadi ν_D hanya bergantung pada $\alpha/2$, λ dan komponen kecepatan u_i .

III. PELAKSANAAN PENGUKURAN

Diagram skematik sistem berkas rangkap yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram skematik LDV Sistem Berkas Rangkap yang digunakan dalam pengukuran

Berkas laser He-Ne dipecah menjadi dua oleh pemecah berkas *Beam Splitter (BS)*. Kedua berkas tersebut difokuskan oleh lensa positif L_1 pada suatu titik dimana pengukuran kecepatan akan dilakukan. Titik perpotongan kedua berkas selanjutnya dinamakan volume pengukuran (*measuring control volume*). Partikel yang akan ditentukan kecepatannya adalah partikel yang melewati volume pengukuran, karena partikel tersebut akan menghamburkan kedua berkas yang datang padanya. Hamburan cahaya dari partikel diterima oleh lensa positif L_2 dan oleh lensa L_3 difokuskan pada lubang *Photo Multiplier Tube (PMT)*. Proses heterodin terjadi pada permukaan aktif PMT. Keluaran PMT dicacah oleh *Multi Channel Scaler (MCS)* dan disimpan dalam format ASCII. Hasil cacahan diproses dengan *Fast Fourier Transform (FFT)* untuk mengalihkan sinyal dari kawasan waktu kedalam kawasan frekuensi. (Brigham, 1974).

Langkah-langkah Pengukuran :

III.1. Mengukur kecepatan aliran dengan mengukur debit.

Langkah ini bertujuan untuk mengetahui jangkauan kecepatan yang dihasilkan oleh pompa yang mempunyai skala dari 1 sampai 10. Alat-alat yang diperlukan adalah tabung cuplikan, selang plastik, gelas ukur dan stop watch. Rumus yang digunakan adalah

$$v = \frac{4 V}{\pi d^2 t} \quad (16)$$

dengan V = volume (m^3), v = kecepatan aliran (m/s), d = diameter pipa tempat cuplikan (m).

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa jangkauan kecepatan pompa adalah $(0,66 \pm 0,12)$ cm/s sampai $(19,51 \pm 1,21)$ cm/s.

III.2. Menentukan Jarak Rumbai.

Berdasarkan rumus (1), agar dapat menghitung jarak rumbai harus dihitung dahulu sudut antara dua berkas yang terfokus. Dua berkas yang keluar dari BS, terpisah sejauh $d_b = (2,40 \pm 0,8)$ cm, jarak fokus lensa $f = (30,00 \pm 0,47)$ cm, maka besarnya sudut $\alpha/2$ adalah

$$\alpha/2 = \tan^{-1} \frac{0,5 d_b}{f} = 2,29061^\circ \quad (17)$$

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha/2} = 7,92 \mu m \quad (18)$$

Jarak rumbai adalah $\Delta x = (7,92 \pm 0,30) \mu m$.

Dengan mengetahui jangkau kecepatan dan jarak rumbai, jangkau frekuensi yang akan ditentukan dapat diperkirakan. Ternyata jangkau frekuensi yang akan diukur antara 0,7 kHz sampai 25 kHz, waktu cuplikan yang dapat dipilih adalah

$$t < \frac{1}{2v} \cong \frac{1}{2(25 \cdot 10^3)} = 2 \times 10^{-5} \text{ s} \quad (19)$$

Waktu cuplikan yang diambil untuk mencacah pulsa dalam penelitian ini adalah 10 μ s.

III.3. Melihat Karakteristik MCS

Langkah ini bertujuan untuk kalibrasi MCS, yaitu dengan memasukkan pulsa yang besar frekuensinya sudah diketahui, kemudian pulsa dicacah dengan MCS dan diolah dengan FFT. Akan dilihat apakah pulsa yang telah dicacah dalam kawasan waktu bila dialihkan ke kawasan frekuensi melalui program FFT hasil frekuensinya sama dengan frekuensi masukan. Alat yang digunakan adalah *pulser*, komputer lengkap dengan card MCS, dan program FFT serta Plotter. Hasilnya menunjukkan bahwa frekuensi yang mendekati nilai masukan adalah yang intensitasnya tertinggi.

III.4. Melakukan pencacahan dengan Sistem Berkas Rangkap.

Untuk melakukan pencacahan, disusun rangkaian seperti Gambar 3. Berkas yang keluar dari sumber laser dipecah menjadi dua oleh BS kemudian kedua berkas difokuskan oleh lensa L_1 sehingga titik potongannya tepat pada sumbu lensa L_2 tempat partikel akan diukur kecepatannya. Lensa L_2 dan L_3 dipasang sedemikian rupa sehingga berkas yang keluar dari tabung cuplikan masuk ke lubang PMT. Keluaran PMT diparalel, satu dihubungkan dengan osiloskop yang lain ke MCS.

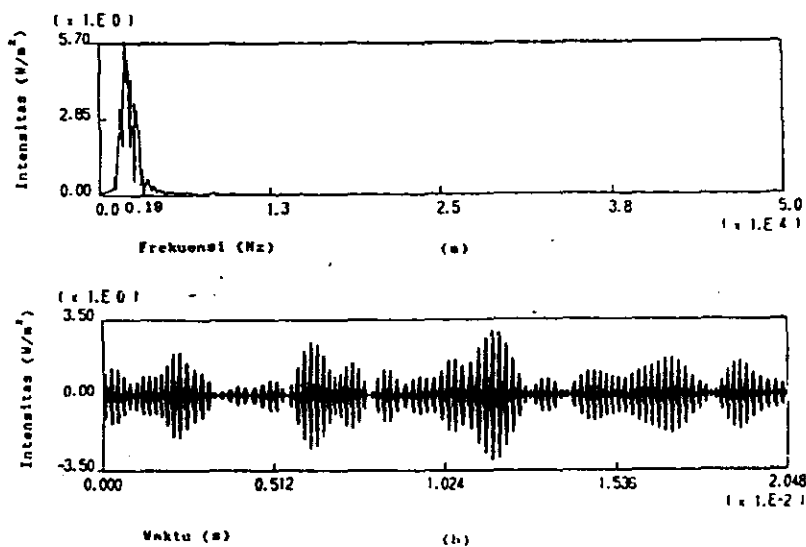
Jika bentuk sinyal keluaran PMT sudah sesuai dengan yang diinginkan, MCS dihidupkan dan siap untuk mencacah. Hasil cacahan disimpan dalam format ASCII.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil pencacahan MCS merupakan sinyal total yaitu sinyal *pedestal* dan *burst Doppler*. Frekuensi yang akan dihitung adalah frekuensi pergeseran Doppler saja, oleh karena itu kedua sinyal tersebut harus dipisahkan dulu dengan tapis lolos tinggi. Proses penapisan ini dilakukan dengan program *PISTA* (*Programmable Interactive Toolbox for Seismological Analysis*).

Tabel 1. Hasil Perhitungan Kecepatan dengan Sistem Pengukuran Debit (I) dan Hasil Perhitungan Frekuensi Serta Kecepatan pada Sistem Berkas Rangkap (II)

	I	II	
	v (cm/s)	v (kHz)	V (cm/s)
1.	$0,7 \pm 0,1$	$0,86 \pm 0,09$	$0,68 \pm 0,09$
2.	$2,19 \pm 0,2$	$2,69 \pm 0,09$	$2,1 \pm 0,1$
3.	$4,6 \pm 0,3$	$6,12 \pm 0,09$	$4,7 \pm 0,1$
4.	$6,8 \pm 0,4$	$8,45 \pm 0,09$	$6,7 \pm 0,3$
5.	$9,3 \pm 0,5$	$12,15 \pm 0,09$	$9,6 \pm 0,4$
6.	$11,4 \pm 0,7$	$14,31 \pm 0,09$	$11,3 \pm 0,4$
7.	$13,3 \pm 0,9$	$16,65 \pm 0,09$	$13,2 \pm 0,5$
8.	16 ± 1	$21,93 \pm 0,09$	$16,9 \pm 0,6$
9.	18 ± 1	$23,43 \pm 0,09$	$18,6 \pm 0,7$
10.	15 ± 1	$25,39 \pm 0,09$	$20,1 \pm 0,8$



Gambar 4. a) Hasil FFT pada kecepatan dengan skala 1
b) Sinyal Sistem Berkas Rangkap pada kecepatan dengan skala 1

Setelah ditapis frekuensi sinyal Doppler yang tinggal dihitung dengan proses *FFT*, sehingga diperoleh frekuensi Doppler yang dicari. Kecepatan dihitung dengan persamaan (14), hasilnya ditunjukkan dalam Tabel 1. Bentuk sinyal pergeseran Doppler dan hasil proses *FFT* bila digambar ditunjukkan dalam Gambar 4.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa, besarnya kecepatan rata-rata partikel yang dihitung dari frekuensi pergeseran Doppler dengan sistem berkas rangkap cocok dengan kecepatan rata-rata aliran air yang diukur dengan sistem pengukuran debit. Untuk kecepatan dengan skala 1, hasilnya berturut-turut adalah $(0,68 \pm 0,09)$ cm/s dan $(0,66 \pm 0,12)$ cm/s. Jangkauan kecepatan yang diukur $(0,68 \pm 0,12)$ cm/s sampai $(20,21 \pm 0,77)$ cm/s dan jangkauan frekuensinya antara $(0,86 \pm 0,09)$ kHz sampai $(25,39 \pm 0,09)$ kHz. Berarti kecepatan partikel rata-rata sama

dengan kecepatan aliran air rata-rata, dan rangkaian alat *LDV* ini dapat digunakan sebagai pengukur kecepatan rata-rata aliran air dengan *MCS* sebagai pencacahnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Brigham E.O., 1974, *The Fast Fourier Transform*. new Jersey : Prentice Hall. Inc
- Dalley, James W. Riley and William F., 1984, *Instrumentation for Engineering Measurement*, New York : John Willey and Sons, Inc.
- Drain L.E., 1980, *The Laser Doppler Technique*, Chichester : John Willey and Sons Ltd.
- Kerker M., 1969, *The Scattering of light*, New York : Academic
- Klein M. V. dan Furtak T.E., 1986, *Optics*, New York : John Wiley and Sons
- Laud B.B., 1985, *Laser and Non Linear Optics*, New Delhi : Wiley - Eastern